

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra automatizace a počítačové techniky v metalurgii

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Průmyslové měření průtoku
Industrial flow measurement

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra automatizace a počítačové techniky v metalurgii

Zadání bakalářské práce

Student: **Kamil Stareček**
Studijní program: B3922 Ekonomika a řízení průmyslových systémů
Studijní obor: 3902R040 Automatizace a počítačová technika v průmyslu
Téma: Průmyslové měření průtoku
Industrial flow measurement
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rozdělení metod měření průtoku.
2. Bezkontaktní metody měření průtoku.
3. Návrh modelu s využitím bezkontaktního průtokoměru.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. STRNAD, R. *Trendy měření průtoku*. 1. vyd. Říčany u Prahy: Gas, 2004. ISBN 80-7328-072-8
2. ĎAĎO, S., BEJČEK, L., PLATIL, A. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-156-x
3. HARDY, J.E. et al. *Flow Measurement Methods and Applications*. New York: Wiley-Interscience, 1999. ISBN 0-471-24509-7
4. WEBSTER, J.G. *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*. Boca Raton: CRC Press, 1999. ISBN 0-8493-8347-1

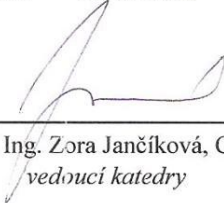
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Romana Garzinová, Ph.D.**


Konzultant bakalářské práce: Ing. Tomáš Barčák

Datum zadání: 30.11.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016


prof. Ing. Zora Jančíková, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
 - Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
 - Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.
- BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání BP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část BP bude zpracována v rozsahu min. 15 stran a celkový rozsah BP bude min. 25 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku.

Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

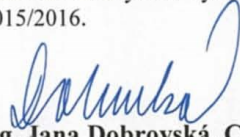
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 28.4. 2016

..... Kamil Štěrba
podpis (jméno a příjmení studenta)

..

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Romaně Garzinové, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odbornou pomoc při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Robertu Frischerovi, Ph.D. za poskytnutí odborných konzultací, vstřícnost a pomoc při praktickém měření.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá měřením průtoku kontaktními a bezkontaktními měřidly. Je rozdělena na literární rešerši, ve které jsou popsány metody, měřidla, jejich výhody a nevýhody. V praktické části je popsán sestavený měřicí řetězec, který obsahuje ultrazvukový průtokoměr, samotné měření pomocí tohoto řetězce a výsledky tohoto měření. V závěru práce jsou popsána doporučení pro další práci s navrženým měřícím řetězcem. Součástí práce je obrazová příloha s fotografiemi měřícího řetězce.

Klíčová slova

měření průtoku, průtokoměr, kontaktní snímače, bezkontaktní snímače, ultrazvukový snímač průtoku

Abstract

This bachelor's thesis deals with flow measurement and with contact and contactless methods. It is divided into theoretical part where methods of flow measurement are described, sensor types and advantages and disadvantages of their use. In the practical part is described constructed measurement system, which contains an ultrasonic flowmeter device, the measuring procedure and its result. At the end of the thesis are suggested for further measurement with the constructed system. The text also contains photographs of the measurement system.

Key words

flow measurement, flow sensor, contact sensor, contactless sensor, ultrasonic flow measurement sensor

OBSAH:

Úvod	9
1 ZÁKLADNÍ POJMY	10
1.1 Průtok.....	10
1.1.1 Objemové měření průtoků	10
1.1.2 Hmotnostní měření průtoků	10
1.1.3 Druhy proudění a Reynoldsovo číslo	11
2 SNÍMAČE PRŮTOKŮ	12
2.1 Rozdělení snímačů.....	12
2.2 Objemové snímače.....	12
2.2.1 Oválný průtokoměr	13
2.2.2 Tělesový průtokoměr	13
2.2.3 Průtokoměr s krouživým pístem	14
2.3 Hmotnostní průtokoměry	14
2.3.1 Hmotnostní průtokoměry na principu Coriolisovy síly	14
2.3.2 Tepelné průtokoměry	15
2.4 Pitotova trubice	16
2.5 Turbínové a lopatkové průtokoměry	17
2.6 Fluidikové průtokoměry	17
2.7 Průřezové průtokoměry	18
2.7.1 Clony.....	19
2.7.2 Dýzy.....	19
2.7.3 Venturiho trubice	20
2.8 Plovákové průtokoměry	20
3 BEZKONTAKTNÍ PRŮTOKOMĚRY	22
3.1 Indukční průtokoměry	22
3.1.1 Magnetické pole.....	23
3.2 Ultrazvukové snímače průtoku	23
3.2.1 Průtokoměr založen na Dopplerově jevu.....	23
3.2.2 Impulzní průtokoměry	25
3.2.3 Zpětnovazebné průtokoměry	26
4 SESTAVENÍ A TESTOVÁNÍ PRŮTOKOMĚRU	28
4.1 Konstrukce měřicí soustavy	28
4.2 Průběh měření	33
4.3 Výsledky měření	37
Závěr	39
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	40
Seznam obrázků:.....	42
PŘÍLOHY:.....	43

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou měření průtoku kapalin. Zabývá se obecnými pojmy spojené s tematikou průtoku, metodami měření, výpočty a jednotkami.

Dále se zaměřuje na různé metody snímání průtoku. Snímače jsou rozděleny do skupin podle principu měření na kontaktní a bezkontaktní snímače. U jednotlivých typů průtokoměrů je popsán způsob měření, vhodnost použití průtokoměrů v různých médiích a výhody a nevýhody při použití. Podrobněji jsou rozebrány bezkontaktní průtokoměry, protože v praktické části byl sestaven bezkontaktní ultrazvukový průtokoměr.

V druhé části práce je popsáno zkušební měření pomocí ultrazvukového průtokoměru vlastní výroby. V práci došlo k návrhu systému, jeho výrobě a odzkoušení. Jsou popsány jednotlivé součásti měřicí soustavy a samotné měření průtoku vzduchu a vody.

Cílem práce bylo dosáhnout správného sestavení jednotlivých částí měřicí soustavy průtokoměru, jejich nastavení a dosažení správného chodu průtokoměru.

Součástí bakalářské práce jsou fotografie a technická dokumentace komponentů sestaveného průtokoměru.

1 ZÁKLADNÍ POJMY

Měření průtoku patří v průmyslu mezi důležité sledované veličiny. Při měření průtoku jsou používány různé principy a velké množství průtokoměrů. Průtok lze snímat v uzavřených potrubích nebo otevřených kanálech. Tento průtok může být nepřetržitý, poté jej lze měřit rychlostními snímači, průřezovými měřidly, elektrickými, magnetickými či ultrazvukovými průtokoměry. Průtok, který neprobíhá nepřetržitě lze sledovat pomocí naplňování známého objemu měřidla nebo za pomoci hmotnostního měřidla, kdy se měří dosažení určité hmotnosti za určitý čas.

1.1 Průtok

Průtok je množství vody, které proteče průtočným profilem za jednotku času. Toto množství lze vyjádřit buď objemem (m^3 , l) nebo hmotností (kg, t).

1.1.1 Objemové měření průtoků

Objemový průtok (Q_V) je objem tekutiny (V), který projde průřezem potrubí za jednotku času (t). Vyjadřuje se v jednotkách $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

$$Q_V = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (1)$$

kde Q_V je objemový průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),

ΔV - objem tekutiny (m^3),

Δt - jednotka času (s).

Při měření předpokládáme, že tekutina zaplňuje celý průtočný profil [2].

1.1.2 Hmotnostní měření průtoků

Hmotnostní průtok (Q_m) je hmotnost tekutiny (m), která projde průtokovým kanálem za jednotu času (t).

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2)$$

kde Q_m je hmotnostní průtok ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),

Δm - hmotnost tekutiny (kg),

Δt - jednotka času (s).

Pro přímé měření se používá Coriolisův průtokoměr nebo tepelný hmotnostní průtokoměr [2].

1.1.3 Druhy proudění a Reynoldsovo číslo

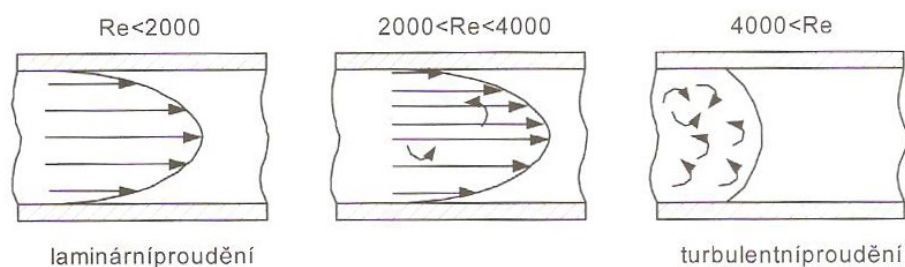
Funkce průtokoměru je ovlivněna druhem proudění tekutiny v potrubí. Proudění může být ustálené či neustálené. Při ustáleném proudění je průtok v daném korytu a v daném čase stejný, naopak při neustáleném se průtok v daném čase mění. V případě ustáleného proudění se rozlišují další dva typy proudění - proudění rovnoměrné a nerovnoměrné. V případě rovnoměrného pohybu je konstantní průtok, ale i tvar, drsnost, sklon koryta, a hloubka a rychlost proudění. V případě nerovnoměrného pohybu je konstantní průtok v čase i prostoru, ale ostatní parametry a proudění jsou proměnné.

Reynolds rozdělil proudění na dva odlišné režimy - laminární a turbulentní [6].

Při laminárním proudění převládá účinek třecích sil, částice kapaliny se pohybují v plynulých navzájem rovnoběžných drahách. Je typické pro viskózní tekutiny a malé rychlosti proudění.

Při turbulentním pohybu se částice kapaliny pohybují po nepravidelných drahách. Dráhy částic tekutin se kříží, vytváří se víry a chaotický pohyb tekutiny, který nepřispívá k průtoku.

Důležitým kritériem režimu je tzv. Reynoldsovo číslo, které udává poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině. Pro kruhové potrubí je teoretická hranice $Re_D = 2320$. Jestliže je číslo větší než 2320 jde o proudění turbulentní, menší než 2320 je proudění laminární. Nicméně přechod z laminárního do turbulentního proudění je postupný a existuje určitá přechodová oblast, kdy se nedá určit, zda jde o proudění laminární či turbulentní [2].



Obr.1: Rychlostní profil pro různé druhy proudění tekutiny [2]

2 SNÍMAČE PRŮTOKŮ

2.1 Rozdělení snímačů

Snímače průtoků můžeme rozdělit na přímé a nepřímé. Přímé snímače měří objem kapaliny, což je možné přesným dávkováním kapaliny na díly a jejím transportem ve směru proudění. Základem jsou odměrné nádoby, které se samy střídavě plní a vyprazdňují. Mohou být také založeny na měření hmotnosti části protékající látky.

Většinou se využívá nepřímých metod, které měří kinetickou energii nebo rychlost proudící tekutiny.

Mezi objemové snímače patří zvonové průtokoměry, které mají přerušovanou činnost, bubnové, které pracují s nepřerušovanou činností, pístové - spojitě či nespojitě. Mezi rychlostní snímače patří průtokoměry plováčkové, turbínové, lopatkové a šroubové, vířivé, indukční, ultrazvukové, průřezové, rychlostní sondy, Coriolisovy, tepelné nebo anemometrické.

2.2 Objemové snímače

Objemové snímače měří přímý objem nebo hmotnost tekutiny. Toto měření může být spojitě, kdy měření odpovídá nahromadění tekutiny po jistý čas. Při diskrétním měření je tekutina dělena na určitá objemová kvanta - dávky. Podle tohoto se pro diskrétní měření používá pojem dávkovací průtokoměry. Tekutina je přitom nucena vtékat do objemově vymezených prostor, které se poté vyprazdňují. Takto se tekutina rozdělí na určité dávky, které jsou potom měřičem registrovány. Takto je možné průtok měřit plynule. Pokud poté vynásobíme známý objem odměrného prostoru počtem naplnění, získáme objem tekutiny, která protekla potrubím za určitou dobu. Měřítkem je poté počet cyklů za jednotku času [2].

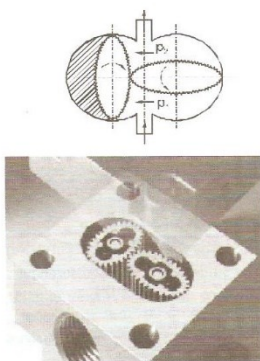
Objemové snímače patří mezi průtokoměry, které se vyznačují schopností měřit s malou nejistotou. Podmínkou správného měření je odplynění, proto se nehodí pro měření zpěněných kapalin. Nehodí se také pro měření kapalin, které se mohou během měření odpařovat.

Tyto průtokoměry nejsou vzhledem k velkému množství pohyblivých částí vhodné pro měření průtoků znečištěných kapalin a kapalin, které obsahují pevné částice.

Mezi objemové měřiče patří např. průtokoměr oválový, tělesový, s krouživým pístem, s kyvným diskem, s oběžným kolem, bubnový, šroubový a další, přičemž první tři uvedené patří mezi nejběžnější typy.

2.2.1 Oválový průtokoměr

Měřidla s oválnými koly jsou složena ze dvou ozubených oválových těles, které zapadají do sebe a komory. Průtokoměr je poháněn rozdílem točivých momentů vyvolaných tlaky p_1 a p_2 na průměty činné plochy pístů. Při tomto otáčení se střídavě naplňují a vyprazdňují odměrné prostory. Každá otáčka značí průtok určitého množství kapaliny. Konstrukce měřicí komory minimalizuje únik kapaliny po stěnách. Počítač poté zaznamenává počet otáček jednoho z těles. Používají se pro průtoky od jednotek $\text{dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ do $10^3 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ při tlacích až 2 MPa a teplotě do 290 °C. Při tomto měření může být dosaženo velmi malých nejistot (až 0,1 %).



Obr. 2: Oválový průtokoměr s ozubenými koly - princip a konstrukce [2]

Tato měřidla se používají pro minerální či hydraulické oleje, rozpouštědla, brzdové či chladicí kapaliny, kapalně plyny, louhy, jedlé a mazací oleje, ale také ovocné mošty, vína, alkoholické nápoje apod.

2.2.2 Tělesový průtokoměr

Tento průtokoměr je levnější a méně přesnou obdobou předchozího průtokoměru. Místo ozubených kol je použito dvou těles ve tvaru piškotu. Otáčivý pohyb soustavy je vázán ozubeným soukolím. Při otáčení se tekutina dostává mezi tělesa a je poté vytlačována ven. Protože obě tělesa provádí vázaný pohyb, stačí měřit rychlost otáčení pouze jednoho z nich. Mohou pracovat i ve vysokých tlacích (až 150 barů) a vysokých teplotách (200 °C), jsou také vhodné pro velké objemové průtoky.

Nevýhodou těchto průtokoměrů je velká nejistota při měření nízkých průtoků [2].

2.2.3 Průtokoměr s krouživým pístem

Nazývá se také prstencový průtokoměr, nebo průtokové měřidlo s kroužkem. Tento průtokoměr nepotřebuje vnější zdroj energie, protože je poháněn průtokem měřené kapaliny. V měřicí komoře se pohybuje krouživý píst. V komoře jsou dva otvory, které slouží pro vtok a výtok kapaliny. V důsledku průtoku kapaliny píst provádí kývavě-krouživý pohyb. Přesnost tohoto průtokoměru je závislá na zpracování, velmi přesné opracování kontaktních ploch je závislé na technologicky náročné výrobě.

Tyto průtokoměry se používají jako domácí vodoměry, průtokoměry technických kapalin v potravinářství, farmacii apod. Jsou také vhodné k měření velmi malých průtoků. Používají se také v extrémních podmínkách při měření agresivních a vysoce viskózních látek, například pro měření průtoku kyselin, pryskyřice, oleje či horkého asfaltu [2].

2.3 Hmotnostní průtokoměry

2.3.1 Hmotnostní průtokoměry na principu Coriolisovy síly

Většinou jsou průtokoměry vyráběny jako měřidla objemová. Údaje z těchto měřidel jsou ale ovlivňovány změnami teploty, tlaku nebo hustoty. Také může výsledek ovlivnit viskozita protékané tekutiny. Při aplikaci jiných průtokoměrů se poté hmotnostní průtok zjišťuje nepřímo výpočtem. Jednou metodou jak zjistit hmotnostní průtok přímo je na základě fyzikálního principu Coriolisovy síly. Coriolisova síla je síla působící na hmotu pohybující se ve směru k nebo od bodu, ve kterém je měřicímu systému vnucován kruhový pohyb. Tyto průtokoměry měří proteklé množství na základě snímání velikosti Coriolisových sil vibrující trubice nebo trubic. Celá měřená kapalina prochází jednou nebo dvěma trubicemi, které jsou zvnějšku uváděny do kmitavého pohybu. Kapalina nejdříve působí proti kmitavému pohybu, ale při výstupu z trubice se již pohybuje souhlasně s vnuceným pohybem. Na okrajích této trubice jsou umístěny snímače, které měří fázový posun a tím i samotný hmotnostní průtok [1] [7].

Tyto průtokoměry jsou používány pro přímé a plynulé měření průtoku a množství kapalin bez ohledu na jejich teplotu, tlak, viskozitu nebo hustotu. Používají se v chemickém, petrochemickém a potravinářském průmyslu. Jsou ideální pro měření chemických látek, potravinářských přípravků, melasy, barev, laků apod. [2]. V potravinářském průmyslu jsou i přes svou pořizovací cenu často používaným měřidlem. Kromě hmotnostního průtoku měří také hustotu a teplotu. Lze s nimi měřit téměř cokoli, od plynů až po homogenní směs mletého

masa, přičemž na vlastnostech měřené látky nezáleží. Díky vysoké přesnosti mohou být použity pro dávkování drahých surovin, nebo surovin na jejichž množství závisí výsledná kvalita produktu. Jsou také poměrně jednoduché k čištění [8].

Použití Coriolisových průtokoměrů má řadu výhod. Mohou měřit kapaliny a plyny s velkou viskozitou za různých podmínek. Mají poměrně vysokou přesnost měření a velmi dobrou opakovatelnost a reprodukovatelnost měření. Mohou měřit v obou směrech a je zde možnost kalibrace vodou. Mezi nevýhody patří poměrně velká tlaková ztráta u některých provedení měřidel, nutnost ochrany proti vibracím a pnutí a také vysoká pořizovací cena [7].

2.3.2 Tepelné průtokoměry

Tepelné senzory patří spolu s Coriolisovými průtokoměry k dalším přímým měřičům hmotnostního průtoku. Pracují na základě tepelné výměny mezi zdrojem tepelné energie a okolím (tekutinou) v závislosti na hmotnostním průtoku. Změny v rozložení teploty jsou úměrné protékající hmotě kapaliny. Používají se pro čisté plyny a kapaliny známého složení a vlastností a s malou hustotou. Z použití plyne mnoho výhod. Je možné přímo měřit hmotnostní průtok, rychlost a přesnost měření a také stabilitu parametrů.

K technickému využití se využívá buď měření ochlazení vyhřívaného tělíska, nebo oteplení tekutiny vyhřívaným prvkem [5]. Podle charakteru tepelného působení média na čidlo a podle uspořádání měřicího systému se tepelné senzory dělí na dva typy - hmotnostní termoanemometry a kalorimetrické hmotnostní senzory [9].

2.3.2.1 Termoanemometry

Senzory tohoto typu průtokoměru zasahují přímo do měřené kapaliny a vyhodnocují její chladicí účinek nucené konvekce na vyhřívané čidlo. V potrubí jsou obvykle umístěny dva odporové teploměry, buďto za sebou nebo vedle sebe. Jestliže se kapalina nepohybuje - první teploměr, který je vyhříván na vyšší teplotu, ztrácí teplo pouze vedením a volnou konvekcí. Jestliže se měřená kapalina pohybuje, ztrácí čidlo teplo hlavně nucenou konvekcí. Druhé čidlo má vždy teplotu tekutiny [9].

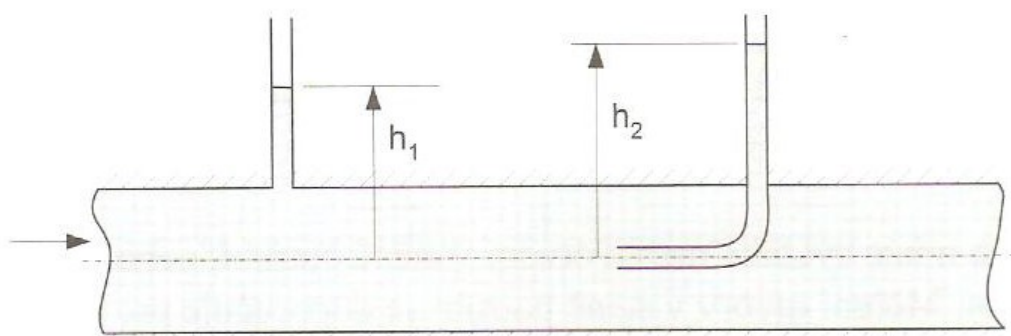
Výhoda těchto snímačů spočívá v jejich provedení, které neobsahuje žádné pohyblivé součástky a jejich konstrukce je poměrně jednoduchá. Jsou tedy mechanicky odolné a spolehlivé. Lze je však použít pouze pro některé kapaliny a měřit jen v uzavřených potrubích. Je s nimi možné měřit i extrémně nízké hodnoty průtoků a za vysokého tlaku [2].

2.3.2.2 Kalorimetrické hmotnostní senzory

U těchto senzorů se narodil od předchozích měří míra oteplení způsobená prouděním hmoty. Kalorimetrický senzor bývá vytvořen na tenkostěnné obtokové kapiláře a kapilárou neproudí celá měřená kapalina ale jen její část. Kapilára má na sobě topné vinutí a teplota její stěny je měřena dvěma senzory. První senzor je blíže vtoku do kapiláry a druhý blíž k výtoku. Pokud průtokoměrem neproudí žádná kapalina, oba senzory naměří stejnou teplotu. Jestliže měřidlem prochází nějaká kapalina, dojde vlivem konvekce k tomu, že čidlo blíže ke vtoku bude mít nižší teplotu než čidlo blíže k výtoku [9].

2.4 Pitotova trubice

Některé průtokoměry určují průtok na základě naměřené hodnoty místní nebo průměrné rychlosti proudění profilu výpočtem. K určování rychlosti tekutiny se používají tzv. rychlostní sondy - např. Pitotova trubice. Ta využívá závislosti dynamického tlaku proudící tekutiny na rychlosti proudění. Je to trubice zahnutá v pravém úhlu, jejíž ústí stojí kolmo k ose proudění. Trubicí proudí tekutina, nad trubicí je otvor a trubička, kam vystoupá voda do určité výšky h_1 , za ní je ještě jedna zahnutá trubice, v ní se voda zastaví, vystoupí do jiné výšky h_2 . Při výpočtu se využívá Bernoulliho rovnice pro proudící kapaliny. Kapalina má v místě ohnuté trubice nulovou rychlost, zatímco v místě rovné trubice má rychlost proudící kapaliny. Kapalina si zachovává svou energii, takže z rozdílu tlaků v obou trubicích se určí její rychlost [5].



Obr. 3: Princip Pitotovy trubice

Pitotova trubice se používá k měření průtoku plynů, např. v letectví, k určení průtoku velmi čistých kapalin a k různým krátkodobým měřením, hlavně k proměřování rychlostních profilů [10].

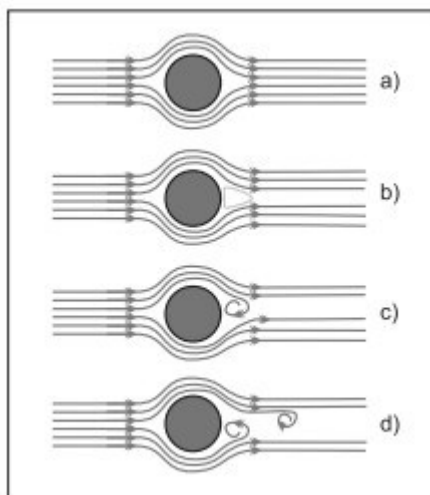
2.5 Turbínové a lopatkové průtokoměry

Základem průtokoměru je rotor s lopatkami ve tvaru turbíny, který je umístěn v ose tělesa průtokoměru. Protékající tekutina uvádí do rotačního pohybu lopatkový rotor. Rychlost otáčení je úměrná střední rychlosti proudění. Otáčky se snímají různými způsoby, jak mechanicky tak i bezdotkově, indukčně, fotoelektricky, elektromagneticky, ultrazvukem apod. Frekvence otáček je přímo úměrná okamžitému průtoku. Při bezdotkovém snímání není nutné těsnění a přístroj lze použít i při velkých tlacích. Měřený objemový průtok není závislý na hmotnosti kapaliny [2].

Měřidla mají široké rozmezí měřicích rozsahů až do stovek $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a je možné je montovat do potrubí v libovolné poloze. Tyto průtokoměry se používají pro měření kapalin za vysokých teplot a tlaků. Nelze je ale využívat u tekutin, které při proudění víří, nebo tekutiny s vysokou viskozitou. Toto se někdy řeší tak, že je před a za rotorem v průtokoměru vložen usměrňovač proudění, který upravuje turbulentní proudění na laminární. Další nevýhodou je, že nejsou schopny měřit průtok úplně od nuly. Problémem je také opotřebení ložisek, a dalších mechanických prvků, které je nutné pravidelně měnit a jsou náchylné k poškození případnými pevnými částicemi v měřené kapalině [11].

2.6 Fluidikové průtokoměry

Mezi fluidikové průtokoměry řadíme měřidla vírová, vířivá a oscilační. Vírové průtokoměry jsou měřidla, která patří mezi nejběžnější z uvedených. Jsou založená na tvorbě Karmanových vírů. Karmanovy víry vznikají za tělesem umístěném v měřicí trubici. Při velmi nízkých rychlostech kapalina proudí rovnoměrně kolem překážky, ale se zvyšující se rychlostí proudění vzniká v oblasti nižšího tlaku turbulentní proudění, přičemž se mění tlak a na jedné straně překážky vzniká vír. Při dalším zvýšení rychlostí vír reaguje s hlavním proudem a posouvá se dál po proudu. Po tomto uvolnění víru se oblast nízkého tlaku posouvá na druhou stranu překážky a zde se vytváří nový vír. Víry vznikají pravidelně na obou stranách překážky a jsou od sebe stejně vzdáleny. Počet takto vytvořených vírů je přímo úměrný rychlosti průtoku kapaliny [12]. Průtok se poté sleduje na počítadle impulzů. Pro spolehlivé určení průtoku je nutné zvolit těleso, které zajišťuje pravidelné odtrhávání vírů. Obvykle se volí tělesa s deltoidového či hranolovitého tvaru umístěné s kolmo na směr proudění [5].



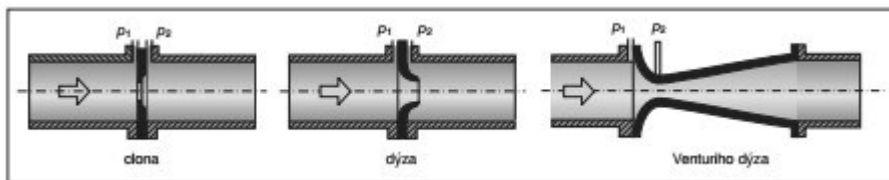
Obr. 4: Tvorba vírů za obtékaným tělesem [12]

Ze začátku používání těchto průtokoměrů byla při měření mnohá funkční omezení, ale v dnešní době došlo k pokroku při výrobě těchto měřidel a často nahrazují dříve oblíbená průřezová měřidla. Vírové průtokoměry se používají k měření kapalin o nízké viskozitě, která je s měnící se teplotou stejná, např. pro chladicí směsi, dále pro relativně čisté kapaliny, plyny a páry, které obsahují pouze minimum znečišťujících látek. Dále se používají pro průtok vzduchu, technických plynů a syté i přehřáté páry. Je možné je použít pro měření nevodivých kapalin, kapalných uhlovodíků, demineralizovanou vodu. Dále nachází uplatnění v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, ovšem ne tam, kde jsou vysoké požadavky na hygienu [12].

2.7 Průřezové průtokoměry

Princip průřezových průtokoměrů je na základě Bernoulliho rovnice, což je princip zachování energie v proudící tekutině. Umístěním škrtící části v průtokoměru dojde ke změně statického tlaku v tekutině před zúžením p_1 a za zúžením p_2 . Tlak se snímá rozdílovým tlakoměrem a je přímo úměrný rychlosti proudění dané kapaliny [2].

Škrtící orgány se rozdělují do dvou skupin na základní škrtící orgány, které není nutné kalibrovat a měření měřidla lze řešit početně a speciální škrtící orgány, které nelze obecně řešit početně a obvykle se provádí kalibrační měření. V průmyslu se používá řada různých škrtících orgánů. Mezi nejčastěji používané typy patří centrická kruhová clona, dýha a Venturiho dýza [10].



Obr. 5: Nejpoužívanější škrtící orgány. Statický tlak před zúžením p_1 a v místě zúžení p_2 [10]

Při použití těchto průtokoměrů musí být splněna řada podmínek, aby měření bylo přesné. Měřená látka musí být homogenní se stálou teplotou a tvořena jen jednou fází. Nesmí obsahovat pevné částice ani bubliny plynu. Potrubí, kde je umístěn škrtící orgán musí být kruhového průřezu, hladké a musí být v určité vzdálenosti od orgánu a za orgánem rovné. Kapalina musí vyplňovat celé potrubí a průtok se nesmí nijak výrazně měnit [10].

Průtokoměry se škrtícími orgány patří mezi nejstarší používané průtokoměry a dlouhou dobu dominovaly trhu. V průběhu minulého století byla vyvinuta řada velmi přesných měřidel v souvislosti s rozvojem letecké a raketové techniky, přesto dnes jsou tato měřidla na ústupu. Důvodem je náročná a nákladná výroba, jestliže má být dosaženo malých nejistot. Hlavním průmyslem, kde se škrtící orgány přestávají používat je průmysl petrochemický, kde se brzy stane standardním měřidlem ultrazvukový průtokoměr. Ultrazvukové průtokoměry obecně nahrazují měřidla se škrtícími orgány [2].

2.7.1 Clony

Mají tvar desky s otvorem vložené do potrubí kolmo na směr potrubí a tímto zmenšují průřez potrubí. Při správné instalaci je nejistota v řádech zlomků procent. Clony jsou obvykle vyrobeny z nerezové oceli s ostrými hranami. Při instalaci clony je nutné mít přímý úsek potrubí před i za clonou [6].

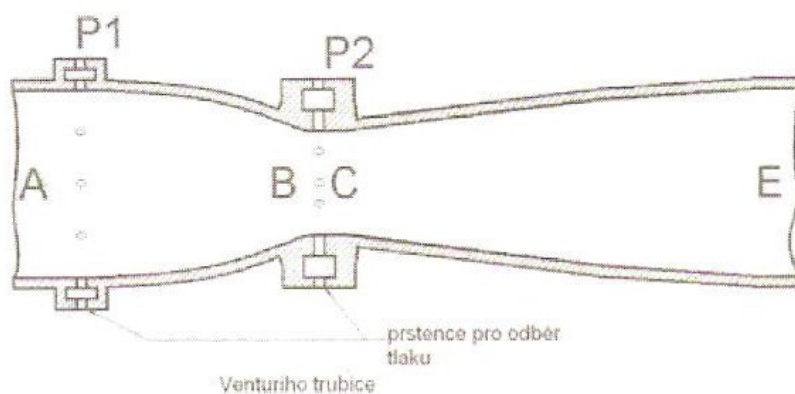
2.7.2 Dýzy

Dýza je tryska upevněná v potrubí mezi dvě přítruby. Má zaoblenou náběhovou část a na straně úplavu je ostré ukončení. Jako u clon i zde je nutné umístit před dýzu uklidňující přímý úsek potrubí. Ve srovnání s clonami je zde menší tlaková ztráta [2].

2.7.3 Venturiho trubice

Tento průtokoměr je navržen tak, aby se zmenšila tlaková ztráta měřicí clony. Tato trubice má dlouhý sbíhavý a rozbíhavý výstupní člen. Profil upravuje podmínky proudění, tak aby nedocházelo k turbulencím a minimalizuje se tření tekutiny. Na rozdíl od clony nevyžaduje tak dlouhý přímý úsek.

Skládá se ze poměrně dlouhého sbíhavého členu (AB) a rozbíhavého výstupního členu (CE). Ve výstupním členu rychlost proudění klesá a dochází ke zvýšení statického tlaku. Vývědy tlaků p_1 a p_2 ústí do prstencových dutin a zde se měří průměrný tlak podél obvodu, který kompenzuje zkreslení rychlostního profilu [2].



Obr. 6: Klasická Venturiho trubice [2]

2.8 Plovákové průtokoměry

Plovákové průtokoměry, nebo také plováčkové průtokoměry či rotametry, jsou průtokoměry, které mají proměnný průřez, patří do skupiny měřičů, které pracují na principu tlakové diference. Hlavní část plovákového průtokoměru je svisle umístěná měřicí trubice v dole zúžené kuželovité trubici. Měřená látka proudí směrem nahoru a v jejím proudu se vznáší rotační tělísko. Tlaková diference je na průtokoměru konstantní, mění se poloha plováčku na základě změny rychlosti. Princip měření spočívá v dosažení rovnováhy plováku, který se v této kuželovité trubici volně pohybuje. Podle velikosti průtoku je tělísko ve vyšší či nižší poloze. Při určitém konstantním průtoku zaujme tělísko určitou polohu, ve které zůstane, dokud se průtok nezmění. Průtok se poté odečítá ze stupnice vedle trubice, nebo na trubici. Plovákové průtokoměry jsou mechanická měřidla, která nevyžadují samostatný zdroj energie [11].

Používají se různé konstrukce těchto průtokoměrů. Základní konstrukce je kuželovitá trubice s rotujícím plováčkem, ale možné jsou také další varianty, např. válcovitá trubice a kuželovitý trnem apod. Tvary plováček se mění podle použití, různé plováčky se používají v různých viskozitách, tlacích, rozsahu průtoku apod. Plováčky jsou obvykle konstruovány s ostrým okrajem, kvůli odečítání hodnot a často v průtokoměru rotují, aby se minimalizovaly ztráty třením o stěny měřidla. Podle tohoto pohybu se často plováčkové průtokoměry nazývají rotametry. Materiály použité pro výrobu plováčku se různí, podle použití, mohou být skleněné, z plastické hmoty nebo z nerez. Trubice jsou vyrobeny buďto ze borosilikátového skla, pro bezpečné kapaliny, nebo z kovu, pokud hrozí prasknutí nebo by tekutina mohla ohrozit okolí. Lze je používat v prostředích s přísnými hygienickými požadavky, jako např. v potravinářství, farmacii, chemickém průmyslu, ale také ve vodohospodářství či jako příslušenství průmyslových pecí. Také je s nimi možné měřit kyseliny, hydroxidy, sloučeniny chlóru a síry, či různá aditiva. Měřidla lze spolehlivě používat i při malém průtoku a při vysokých teplotách a tlacích [2].

3 BEZKONTAKTNÍ PRŮTOKOMĚRY

Bezkontaktní průtokoměry jsou používány k přesnému měření průtoku kapalin v uzavřených potrubích bez nutnosti instalace mechanických částí do průtokového systému. Protože průtokoměr není v kontaktu s měřeným médiem nemůže docházet k poškození přístroje protékanou kapalinou či jiným nežádoucím jevům.

3.1 Indukční průtokoměry

Indukční průtokoměry jsou založeny na Faradayově indukčním zákonu při pohybu vodiče v elektrickém poli. Nicméně Lorentzův zákon vysvětluje lépe fyzikální podstatu průtokoměru, proto by bylo vhodnější označení elektromagnetický, nebo jak je uváděno v zahraniční literatuře magnetický průtokoměr.

Jak bylo již řečeno v úvodu, většina odvození vzniku napětí se opírá o Faradayův indukční zákon. Vznik napětí je vysvětlen jako důsledek časové změny magnetického toku při pohybu vodivé kapaliny v potrubí. Tekutina se pohybuje potrubím a kolmo na směr jejího pohybu působí magnetické pole. Za pomoci čidel lze měřit napětí, které je tvořeno pohybem tekutiny v magnetickém poli. Permanentní magnet nebo elektromagnet tvoří magnetické pole, které prochází potrubím i kapalinou. Napětí se mění na základě změny rychlosti vodivé tekutiny v tomto magnetickém poli.

Konstrukční řešení těchto měřidel je obecně dvojí. Buďto jsou elektrody přímo v kontaktu s proudící tekutinou, nebo jsou umístěny vně potrubí. V prvním případě musí být elektrody vyrobeny z vodivého a nemagnetického materiálu. Tyto elektrody ale nejsou vhodné do prostředí, kde se mění teplota, nebo do horkých kapalin či kyselin.

Novějším řešením, které se začíná používat, je elektromagnetický indukční průtokoměr s izolovanými plošnými elektrodami, které jsou umístěné na vnějším povrchu měřicí trubice. Úsek v potrubí, kde jsou umístěny póly magnetu jsou z neferomagnetického a nevodivého materiálu. Elektrody jsou tak jako v předchozím konstrukčním řešení umístěné kolmo k siločarám budícího magnetického pole. Při zaplněném potrubí není přesnost ovlivněna fyzikálními vlastnostmi soustavy. Tyto průtokoměry neobsahují žádné pohyblivé či mechanické části, které by se mohly opotřebovat a měření jimi neovlivňuje tlak, teplota, hustota ani složení kapalin. Měření není závislé ani na průřezu potrubí, kde probíhá snímání.

Tyto průtokoměry lze použít pro chemicky agresivní látky, tekutiny s pevnými částicemi, či kašovitými hmotami a pastami. Hlavním požadavkem na měřenou kapalinu je, aby byla elektricky vodivá a potrubí bylo naopak nevodivé.

3.1.1 Magnetické pole

Jednotlivé přístroje se liší na základě toho, jakým způsobem je generováno magnetické pole. Základní rozdělení je na magnetické pole stejnosměrné a střídavé.

Stejnosemnné magnetické pole je výhodné z hlediska konstrukce, přičemž stačí použít permanentní magnety. Nicméně při použití těchto magnetů vzniká řada problémů, např. při zpracování malých stejnosměrných napětí nebo možnost vzniku elektrolýzy, při které se uvolňují nevodivé plyny, v proudící kapalině. Také je problematické měření malých průtoků. Stejnosemnné pole je ale vhodné pro měření rychlých změn rychlosti. Střídavé magnetické pole se tvoří pomocí střídavých zesilovačů, v nichž se neprojevuje rušivý samovolný posuv nuly.

3.2 Ultrazvukové snímače průtoku

Ultrazvukové průtokoměry jsou založeny na změně rychlosti šíření ultrazvukového vlnění nebo změně frekvence tohoto vlnění při průtoku kapaliny. Ultrazvukové vlnění se šíří mezi vysílačem a přijímačem, které se umísťují na stěnu potrubí, v němž se měřená kapalina pohybuje určitou rychlostí. Proudění kapaliny způsobí změnu rychlosti ultrazvukového vlnění, které je vysíláno i přijímáno ultrazvukovým měřičem [6].

V současné době se využívá tří různých typů ultrazvukových průtokoměrů. Průtokoměry, které využívají Dopplerův jev, impulzní a zpětnovazebné průtokoměry [2].

3.2.1 Průtokoměr založen na Dopplerově jevu

Tento průtokoměr lze použít v případě, že kapalina obsahuje pevné částice, které odrážejí zvuk nebo vzduchové bubliny. Skládá se z vysílače a přijímače ultrazvuku, které jsou připevněny na vnější straně potrubí. Vysílač posílá ultrazvukový signál o známé frekvenci, ultrazvuk se odrazí od částice v kapalině, u které předpokládáme, že se pohybuje stejně rychle, jako je průtok kapaliny. Rozdíl frekvencí vyslaného a přijatého signálu je označován jako dopplerovský posun. Snímač poté vyhodnocuje změnu frekvence této ultrazvukové vlny [11].

Jestliže vysílač vysílá ultrazvuk o frekvenci f , rychlost ultrazvuku je c a rychlost unášené částice v . Pro frekvenci přijatou částicí platí:

$$f_1 = \frac{c + v \cos \alpha}{c} f \quad (3)$$

Pro frekvenci přijatou přijímačem platí:

$$f_2 = \frac{c}{c - v \cos \alpha} f_1 \quad (4)$$

Po vyloučení f_1 za předpokladu, že c je podstatně větší než v dostaneme:

$$\Delta f = f_2 - f = \frac{2 f v \cos \alpha}{c} \quad (5)$$

- kde f_1 je frekvence přijaté částice,
 f_2 - frekvence přijatá přijímačem,
 c - rychlost ultrazvuku,
 v - rychlost unášené částice,
 α - úhel, který svílá vysílač s osou potrubí

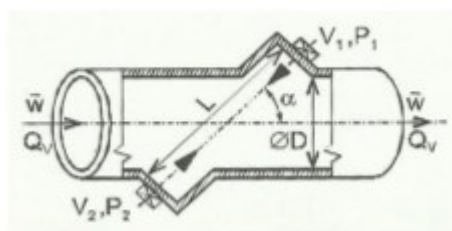
V současné době se využívají dva základní Dopplerovské systémy, které se liší způsobem vysílání a přijímání ultrazvukových vln. V praxi se oba systémy většinou kombinují. První systém CW, z angličtiny Continuous Wave, využívá dva samostatné přijímače a vysílače, přičemž jeden neustále přijímá a druhý neustále vysílá. Výhoda této metody spočívá ve vysoké přesnosti. Druhý systém PW, z angličtiny Pulse Wave, využívá pouze jednoho přijímače a vysílače. Signál se šíří z vysílače dokud se neodrazí od částice a poté se vrací zpět s jinou frekvencí. Výhodou tohoto měření je, že můžeme přesně určit vzdálenost a místo měření.

Průtokoměry dopplerovského typu musí obsahovat koncentraci suspendovaných částic nejméně 25 ppm o velikosti nejméně 30 μm . Nejistota měření závisí na rychlostním profilu kapaliny, na obsahu a velikosti částic ale i rozměrech potrubí. Vhodnou kalibrací lze dosáhnout nejistoty kolem 1 %.

Přístroje tohoto typu se vyrábí také jako přenosné. V tomto případě je lze umístit vně potrubí a využívají se tam, kde vzhledem k obsahu částic mohou být ostatní měřidla nevhodná. Bývají obvykle použity pro měření průtoku kalů, nebo také v měření průtoku krve v lékařství [5].

3.2.2 Impulzní průtokoměry

Impulzní průtokoměry neboli průtokoměry s vyhodnocováním doby průchodu signálu jsou založeny na tom, že se ultrazvukový signál pohybuje rychleji ve směru toku látky, než proti němu. Doba prodlevy mezi těmito signály je poté přímo úměrná rychlosti průtoku. Frekvence ultrazvukového vlnění je obvykle mezi 500 kHz až 1 MHz. Doba prodlevy se měří v krátkých intervalech ve směru i proti směru proudění, proto nemají odchylky viskozity a teploty žádný vliv na přesnost měření.



Obr. 7: Impulzní průtokoměr [2]

Impulzní průtokoměr se skládá z jednoho nebo více párů vysílačů a současně přijímačů signálu. Těmito vysílači se současně posílá ultrazvukový signál ve směru i proti směru proudění. Signály jsou vysílány ve formě impulsů a vyhodnocují se časové rozdíly při průchodu impulsů v obou směrech šíření. V tomto uspořádání vysílač/ přijímač V1, P1 vysílá impuls k vysílači/přijímači V1, P2. Impuls z P2/V1 se šíří rychlostí $c + v \cos \alpha$, kde c je rychlost šíření ultrazvukové vlny v tomto prostředí a v střední rychlost proudící kapaliny. Doba mezi vysláním a přijetím impulsu pro dvojice přijímač/vysílač je t_1 a t_2 , jejich rozdíl je tedy $\Delta t = t_2 - t_1$. Zde platí rovnice:

$$\Delta t = \frac{2 L v \cos \alpha}{c^2 - v^2 \cos^2 \alpha} \quad (6)$$

Za předpokladu, že $v^2 \ll c^2$, můžeme vztah zjednodušit na:

$$v = \frac{c^2}{2 L v \cos \alpha} \Delta t \quad (7)$$

Při použití substituce $c = 2L/(t_1 + t_2)$ získáme ze vztahu výsledný vztah pro střední rychlost a objemový průtok.

$$v = \frac{\Delta t}{(t_1 + t_2)^2} \cdot \frac{2L}{\cos \alpha} \quad (8)$$

$$Q_v = \frac{\pi D^2 L}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{\Delta t}{(t_1 + t_2)} \quad (9)$$

kde Δt je rozdíl doby mezi vysláním a přijetím impulzu,

L - vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem,

v - střední rychlost proudící kapaliny,

c - rychlost šíření ultrazvukové vlny,

Q_v - objemový průtok,

D - průměr potrubí,

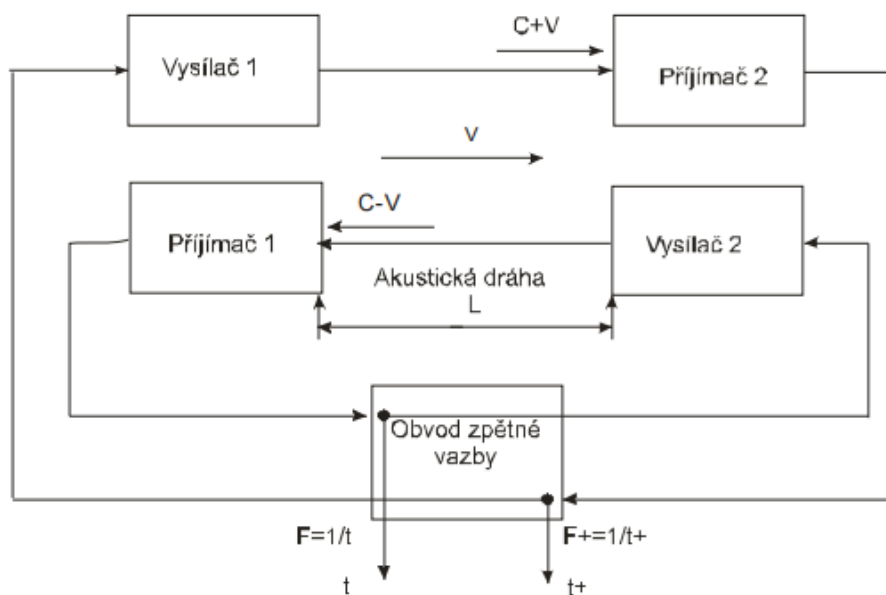
Zdroj ultrazvukových vln může být umístěn v potrubí, ve styku s kapalinou, nebo umístěn mimo potrubí z vnější strany, kdy se bude jednat o bezdotykové měření.

Používání ultrazvukových snímačů nese řadu výhod. Zaprvé je to univerzálnost použití, kdy lze měřidlo použít pro měření jak kapalin, tak plynů, ale také např. páry. Lze je použít v jakékoli poloze a jeden ultrazvukový průtokoměr může nahradit více průtokoměrů jiných typů. Tímto typem snímače lze také zamezit velké tlakové ztrátě při měření, jsou nenáročné na údržbu díky tomu, že neobsahují žádné pohyblivé části. Jsou sice náročné na kalibraci, ale jinak je jejich instalace jednoduchá. V neposlední řadě je velkou výhodou, že jejich činnost je nezávislá na vlastnostech měřené tekutiny a mají široký rozsah měření a mohou měřit až několik veličin současně.

Ultrazvuková měřidla se používají zejména k měření průtoku nevodivých kapalin - např. ropy a dalších petrochemických produktů, přičemž byla přijata jako standard v oblasti kritických fakturačních měření v oblasti petrochemického průmyslu.

3.2.3 Zpětnovazebné průtokoměry

Měření průtoku pomocí zpětnovazebních průtokoměrů probíhá na dvou měřicích drahách. Dráhy tvoří dvojice vysílač – přijímač a jsou diferenčně uspořádané. V první dvojici se sčítá rychlost ultrazvuku c a rychlost průtoku v a ve druhé dvojici se rychlost průtoku v odečítá od rychlosti ultrazvuku c .



Obr. 8: Zapojení ultrazvukových měničů průtokoměru do zpětné vazby [2]

Dobu oběhu dráhy vyjádříme rovnicemi:

$$t_- = \frac{L}{c - \cos \alpha} \quad (10)$$

$$t_+ = \frac{L}{c + \cos \alpha} \quad (11)$$

Pro rozdíl časových intervalů platí vztah:

$$\Delta t = t_- - t_+ = \frac{2L v \cos \alpha}{c^2 - v^2 \cos^2 \alpha} \quad (12)$$

Pro rychlost kapaliny odvodíme vztah:

$$v = \frac{c^2}{2L \cos \alpha} \Delta t \quad (13)$$

kde t_- je doba průchodu signálu (jednotka),

t_+ - doba průchodu signálu,

c - rychlost ultrazvuku v kapalině,

L - vzdálenost vysílače a přijímače,

v - průměrná rychlost kapaliny,

α - úhel sklonu paprsku (úhel mezi vektory c a v)

4 SESTAVENÍ A TESTOVÁNÍ PRŮTOKOMĚRU

Cílem bylo zkonstruovat ultrazvukový průtokoměr a ověřit jeho funkčnost. Před samotným měřením a konstrukcí průtokoměru bylo nutné podniknout několik kroků. Prvním krokem byl návrh systému a veškerého příslušenství. Nejdříve se provedla vizualizace celé sestavy a všech přístrojů nezbytných v měřicí sestavě. V měřicí soustavě byly použity následující přístroje:

- 3D tiskárna FELIX1
- transceiver
- osciloskop
- generátor
- laboratorní zdroj
- nádoba na vodu
- držák

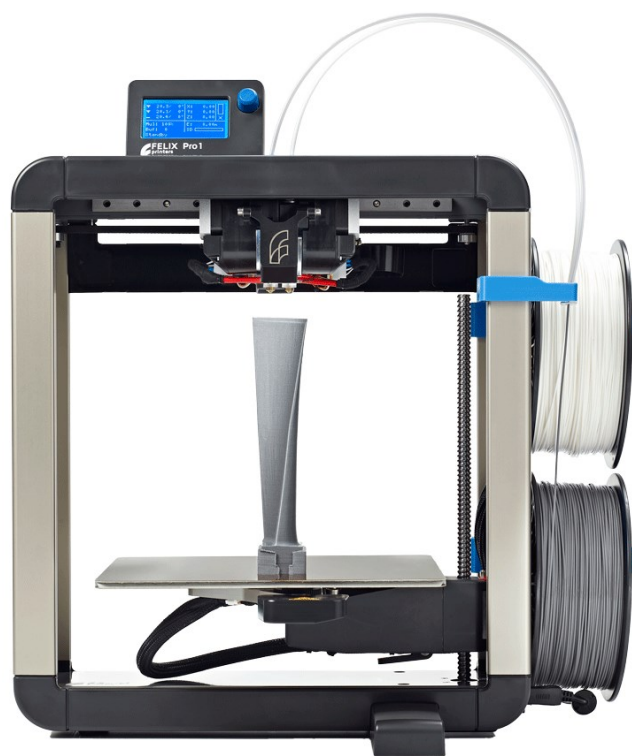
4.1 Konstrukce měřicí soustavy

Po opatření všech přístrojů potřebných pro konstrukci soustavy se začalo se samotným procesem měření. Nejdůležitější částí celé soustavy bylo tělo průtokoměru. Toto tělo se vymodelovalo pomocí programu 3D Rhino, což je program, který se používá ve strojírenství, architektuře ale i například desingu. Tímto programem je možné vymodelovat jakýkoliv myslitelný tvar, který má požadovanou přesnost. Takto vymodelované tělo průtokoměru se zpracovalo na 3D tiskárně FELIX Pro 1. Tato tiskárna je profesionální 3D tiskárna, která nabízí velmi dobrou kvalitu tisku, automatickou kalibraci podložky a další výhodné funkce. Její kvalitní tiskové hlavy mají vysokou tepelnou odolnost a mohou být použity i pro tisk s velmi vysokou tiskovou teplotou. Jako tiskový materiál lze použít PLA, ABS, PET, PVA a další. Pro tisk byl přírůstek materiálu nastaven na 0,2 mm s tryskou o průměru 0,35 mm. Pro tisk se použil materiál PLA, který je univerzálním tiskovým materiálem, vhodným také pro tisk velkých objektů. Největší výhodou použití tohoto materiálu je jeho odolnost proti kroucení. Materiál lze použít i při tisku při nižších teplotách. Po tisku lze materiál dále opracovávat běžnými postupy, ale nelze jej dobře strojově brousit kvůli nízkému tavnému bodu. Ruční broušení je ale možné bez omezení. Tento materiál je možné dobře lakovat i vrtat. Je to biologicky odbouratelný materiál, který se vyrábí především z kukuřičného škrobu nebo z cukrové třtiny. Díky svým vlastnostem je v průmyslu stále více využíván [14].

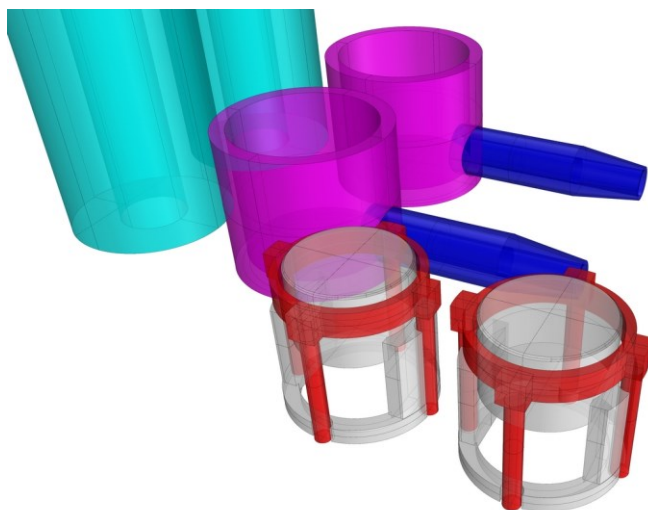
Parametry pro tisk s materiálem PLA a ABS:

Název parametru	PLA	ABS
Maximální velikost objektu	Bez omezení	80 mm
Teplota pro základní mřížku	195°C	235°C
Teplota pro Interface	195°C	235°C
Teplota pro tisk – první vrstva	200°C	ABS Natural - 230°C ABS Barvené - 232°C
Teplota pro tisk – běžné vrstvy	210-220 °C	ABS Natural - 240-245°C ABS Barvené - 243-248°C
Rychlost tisku – malé objekty (do 80 mm)	Až 30 mm/sec	16-20 mm/sec
Rychlost posunu extruderu – malé objekty	Až 60 RPM	26-36mm/sec - 38-46 RPM
Rychlost tisku – větší objekty	20 mm/sec	10-12mm/sec
Rychlost posunu extruderu – větší objekty	48 RPM	16-22mm/sec 30-38 RPM

Tab. 1: Parametry pro tisk na 3D tiskárně [14]



Obr. 9: 3D tiskárna FELIX Pro 1 [13]



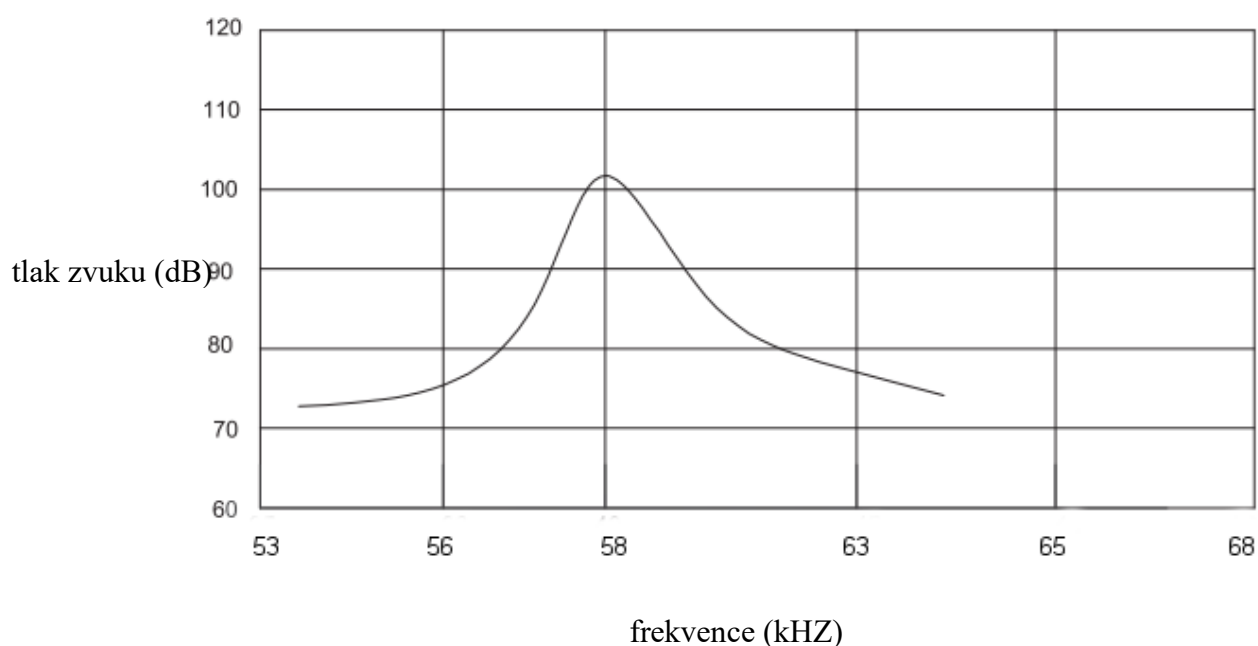
Obr. 10: Předloha průtokoměru pro 3D tisk

Po zhotovení konstrukce průtokoměru bylo nutné zakomponovat transceiver, který je nedílnou a neméně podstatnou součástí měřicí soustavy. V tomto případě byl použit transceiver značky MULTICOMP - MCUSD14A58S9RS-30C, což je piezoelektrický ultrazvukový senzor, který se skládá z vysílacího a přijímacího zařízení. Tento transceiver pracuje kmitočtu 58 kHz s voděodolnými stěnami.

Technická specifikace snímače:

Sériové číslo	MCUSD14A58S9RS-30C 2
Konstrukce	Vodotěsná
Použitá metoda	Duální metoda
Středový kmitočet	58 ± 1 kHz
Hladina akustického tlaku (dB)	$5 \geq 85$ (30 cm / 10 V RMS)
Citlivost	(dB) ≥ -90 dB/V/ μ bar
Vzor paprsku	$110 \times 50^\circ$
Kapacita (pF)	$2000 \pm 25\%$ 1 kHz
Rozsah provozních teplot	-40°C až 85°C
Rozsah skladovací teploty	-40°C až 85°C
Přípustné vstupní napětí (Vp-p)	160 Vp-p
Materiál pouzdra	hliník

Tab. 2: Technická specifikace snímače MCUSD14A58S9RS-30C 2 [15]

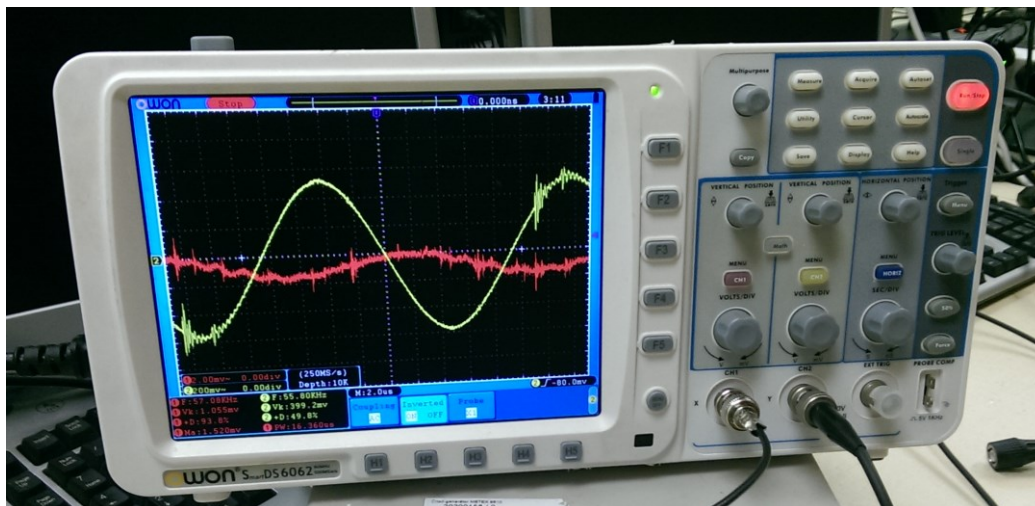


Graf 1: Hladina akustického tlaku



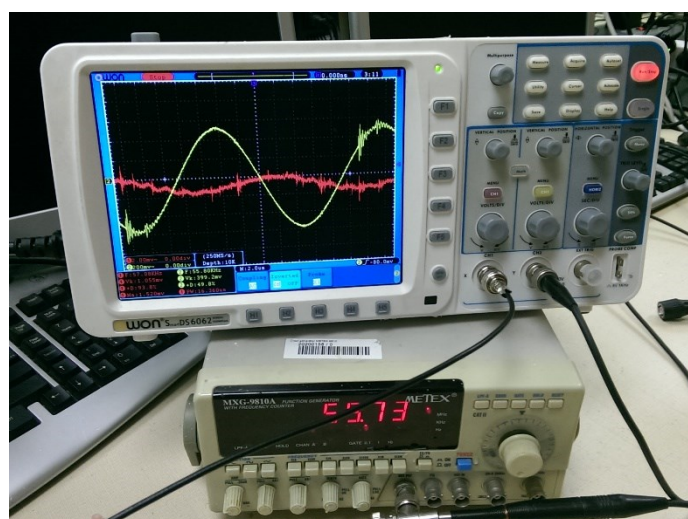
Obr. 11: Transceiver – vysílací/přijímací zařízení

Dalším přístrojem sestavy je osciloskop. Tento přístroj je nutný pro zobrazení viditelného záznamu měřitelného výstupu - zobrazuje průběh napětí v čase. Osciloskopy se podle technického provedení dělí na analogové, digitální a softwarové. Byl použit Smart Digitální Osciloskop s možností Ukládání Dat OWON SDS Série 6062. Digitální osciloskop se v principu skládá z několika částí – zesilovače, A/D převodníku, vestavěného počítače a LCD displeje.



Obr. 12: Osciloskop

V měřicí sestavě byl použit generátor METEX MXG-9810-A. Tento generátor s čítačem slouží jako zdroj střídavého signálu se sinusovým, případně pilovitým nebo jiným průběhem. Čítač slouží k určení frekvence periodického signálu. Generování signálů je s frekvencí řádově do stovek MHz.



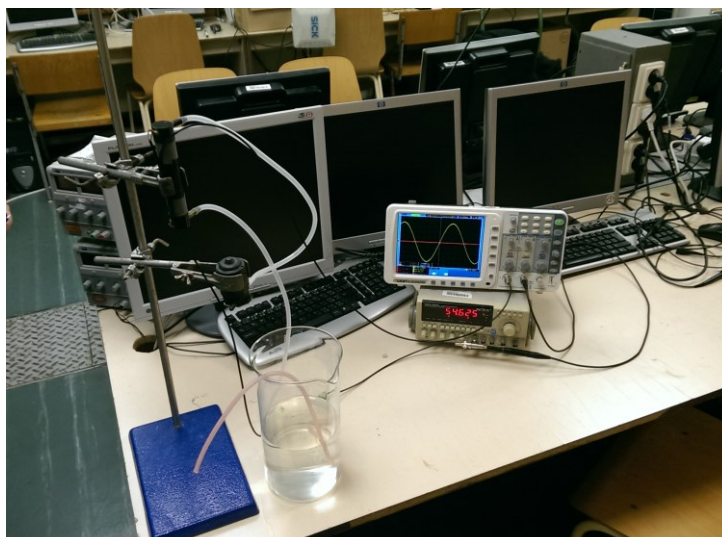
Obr. 13: Osciloskop s generátorem

K regulování elektrického napětí generovanému z alternátoru byl použit laboratorní zdroj DC power supply.



Obr. 14: Laboratorní zdroj

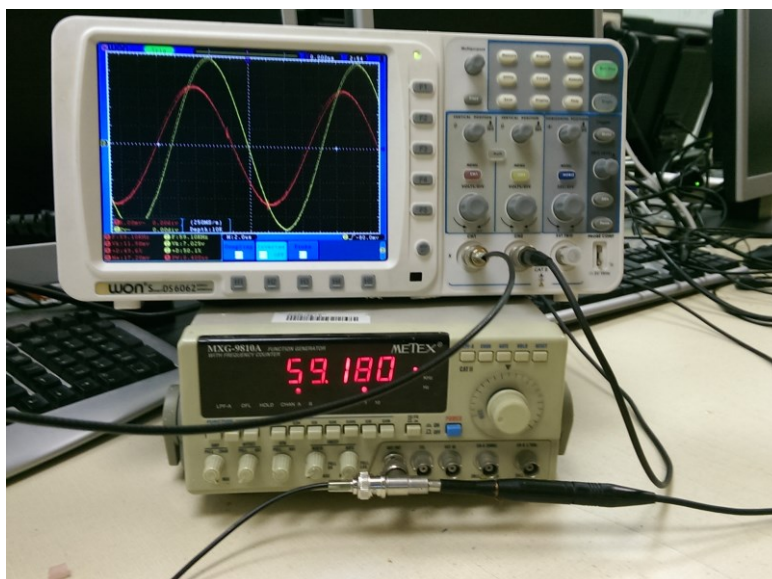
Po propojení všech přístrojů v sestavě následovalo první zkušební měření.



Obr. 15: Kompletní měřicí sestava

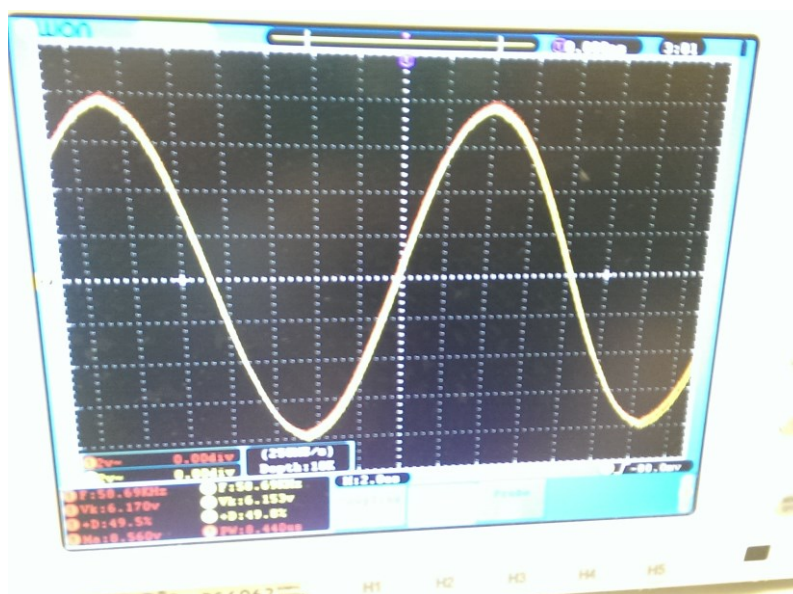
4.2 Průběh měření

První zkušební měření proběhlo se vzduchem. Do hadiček se místo vody vháněl vzduch a to pomocí foukání ústy. Průtokoměr reagoval dobře a výsledky napovídaly bezproblémovému provozu průtokoměru. Výstupní hodnoty na osciloskopu ukazovaly 17 V. Na osciloskopu bylo vidět, že vrcholy se vůči sobě fázově posunují. Tento výsledek napověděl, že je průtokoměr připraven na zkušební měření s vodou.



Obr. 16: Zkušební měření se vzduchem

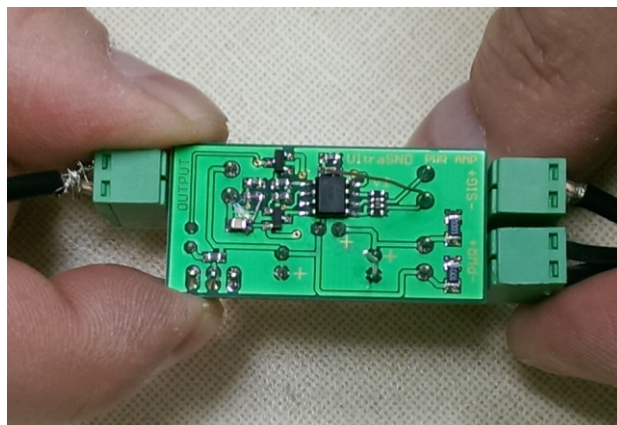
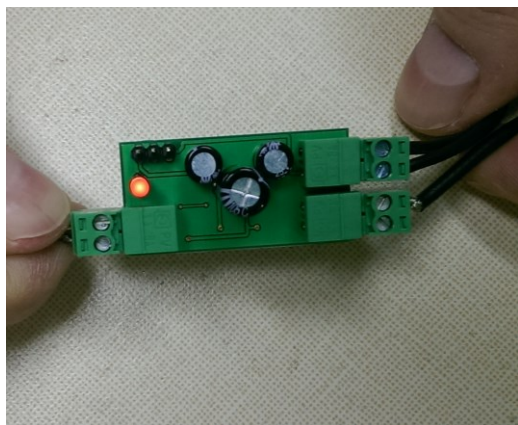
Další měření průtoku proběhlo s vodou. Měřicí sestava zůstala ve stejném složení jako při měření průtoku vzduchu, přičemž se signál budil maximálně 3 V. Po předchozím měření se vzduchem se očekávalo, že výsledek bude přibližně stejný jako v předchozím měření, ale na osciloskopu se neukázaly žádné měřitelné výstupní hodnoty. Výstupní hodnota tedy byla nula.



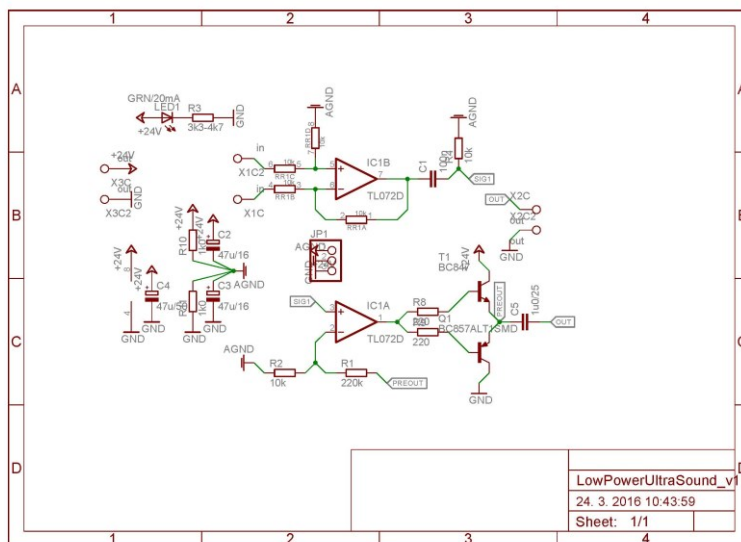
Obr. 17: Výsledek měření bez zesilovače

Řešením této situace bylo použití zesilovače pro piezo transducer, který umožňuje zesílení signálu, zachytitelný na osciloskopu. Vstupní signál je přiveden přes vazební kondenzátor a odpor na neinvertující vstup operačního zesilovače. Tento signál je v operačním

zesilovači zesílen a přiveden na bázi výkonových tranzistorů. Operační zesilovač tedy funguje jako budič koncových tranzistorů. Koncové tranzistory zesílí signál na potřebnou výstupní úroveň signálu. Celkové zesílení zesilovače jako celku je dáno odpory. Děličem z odporů je vytvořena umělá nula pro operační zesilovač. Výstupní výkon je určen velikostí napájecího napětí a výběrem koncových tranzistorů. Zesilovač není odolný proti zkratu na výstupu. Tento zesilovač byl navržen a vyroben ve spolupráci s Ing. Robertem Frischerem, Ph.D. Návrh zesilovače trval 2 dny, jeden den trvalo osazení a týden byla čekací lhůta na dodání desky.

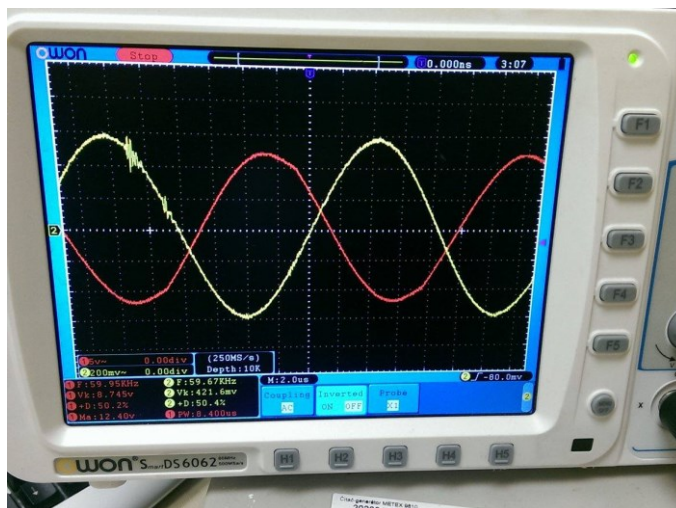


Obr. 18: Zesilovač přední / zadní strana



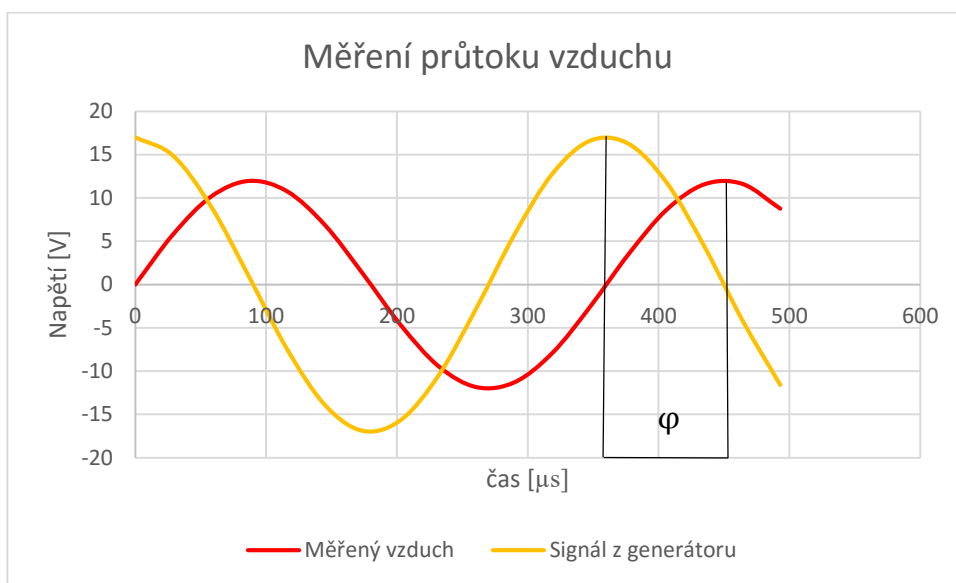
Obr. 19: Schéma zesilovače

Po výrobě zesilovače došlo k zapojení zesilovače do sestavy. Celé měření se opakovalo stejným způsobem jako poslední měření jen s použitím zesilovače. Při měření se na osciloskopu objevily měřitelné výstupní hodnoty. Tímto se potvrdilo, že zesilovač funguje. Výstupní hodnoty byly 8,5 V a ve špičce 12,5 V. Tyto hodnoty už byly srovnatelné s hodnotami měření vzduchem.

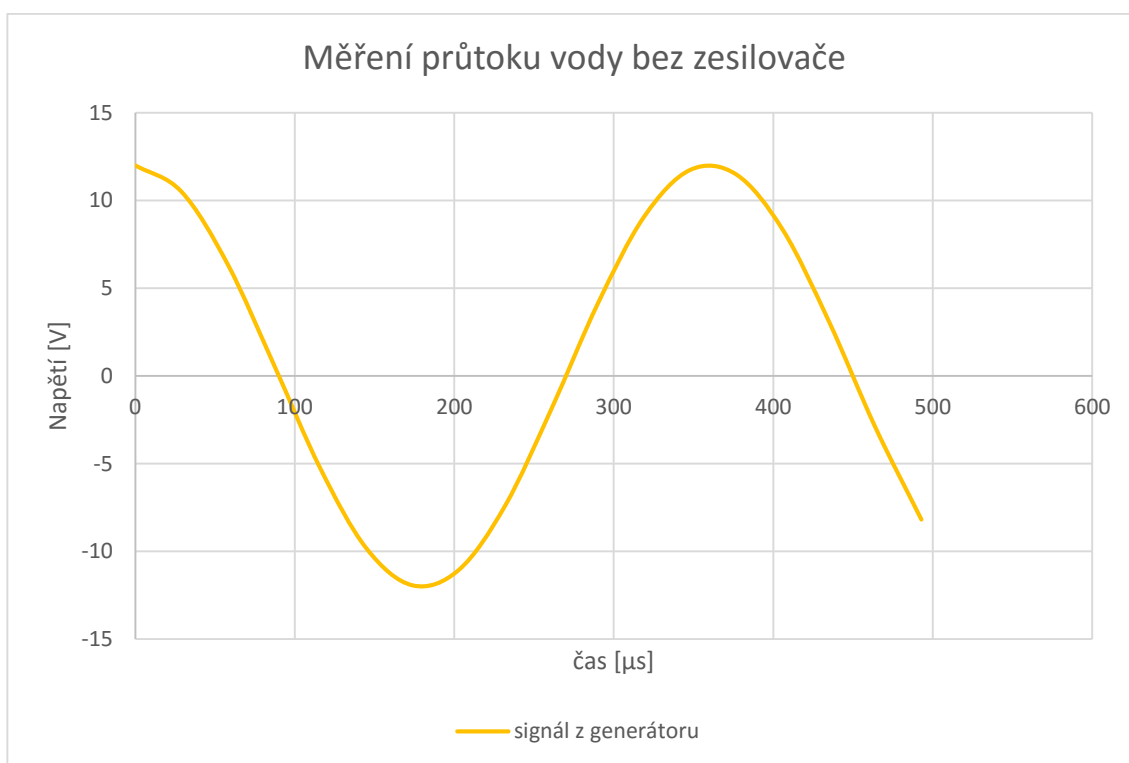


Obr. 20: Výstupní hodnoty po použití zesilovače

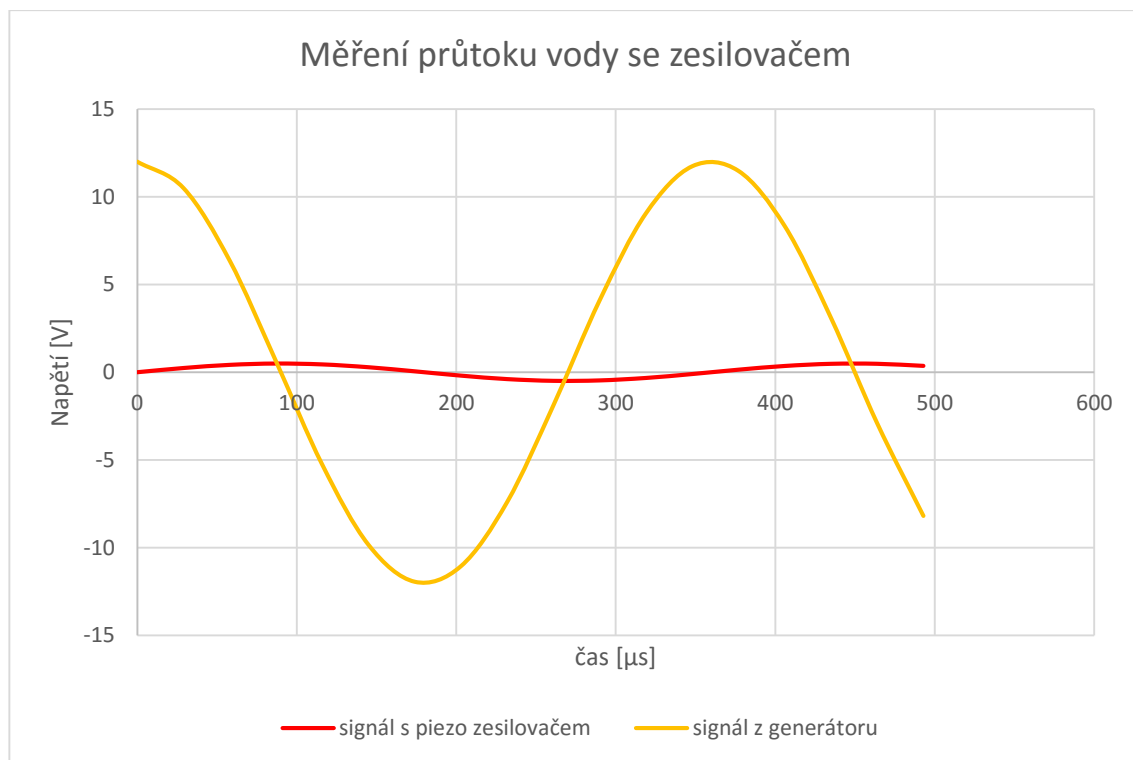
4.3 Výsledky měření



Graf 2: Měření průtoku vzduchu



Graf 3: Měření průtoku vody bez zesilovače



Graf 4: Měření průtoku vody se zesilovačem

V závěru měření bych chtěl shrnout naměřené hodnoty všech tří typů měření. Měření proběhlo se vzduchem, následně s vodou a v poslední řadě s vodou a zesilovačem. Hodnoty se zaznamenaly a průběh měření se přenesl do grafické podoby. Na grafech je vidět funkčnost průtokoměru, ale pro úplný bezproblémový chod se doporučují další měření a opatření. Všechna měření, která se provedla, byla zopakována minimálně 2 krát, aby se potvrdila opakovatelnost výsledku.

Závěr

Cílem práce byla rešerše literatury zabývající se problematikou měření průtoku s důrazem na bezkontaktní metody, konkrétně ultrazvukové metody. Teoretická část práce pojednává o tradičních i moderních trendech v měření průtoku a popisuje principy jednotlivých typů průtokoměrů a jejich možnosti využití v průmyslu.

Dalším cílem práce bylo navržení a vyzkoušení průmyslového bezkontaktního průtokoměru. Navržení a sestavení průtokoměru bylo úspěšné, ale při samotném použití došlo k několika problémům, které bude vhodné dále odstraňovat a tímto průtokoměr uvést do bezproblémového chodu.

Navrhuji tyto kroky, které povedou k zlepšení. První úprava by byla již při 3D tisku samotného průtokoměru. Oproti původnímu průtokoměru bude nutné konstrukci vytisknout v nejlepší kvalitě, protože při tisku ve standardní kvalitě se ukázala jako neodstačující, protože při měření došlo k nasávání vzduchu. Kvalita se nastaví na nejvyšší s přírůstkem materiálu 0,05 mm, čímž se prodlouží tisk na 22 hodin. Také bude vhodné vyzkoušet místo materiálu PLA materiál ABS.

Dále bych doporučoval vyzkoušet měření s klasickými nevoděodolnými transistory, které pracují na kmitočtu 40 kHz. Nejdříve se testování provede na vzduchu. Do jednoho transcieveru se bude posílat signál a z druhého se bude snímat, přičemž se bude přibližovat a oddalovat například deska, čímž bude možné zjistit, zda nastává odraz a posun fáze. Jestliže tato část měření proběhne úspěšně celý proces se znovu vyzkouší ve vodě.

Dalším problémem byl zesilovač. Použitý zesilovač nebyl dostatečně silný, protože maximální napětí bylo okolo 11 V. Cílem bude použít silnější zesilovač, jehož se bude možné dostat na hodnoty 50-60 V na výstupu, aby signál byl intenzivní. Doporučuji také použít digitální generátor signálu s nastavitelným přesným kmitočtem pomocí jednočipového mikrokontroleru (Arduino).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] STRNAD, R. Trendy měření průtoku. 1. vyd. Říčany u Prahy : Gas, 2004. ISBN 80-7328-072-8.
- [2] ĎAĎO, S., BEJČEK, L., PLATIL, A. Měření průtoku a výšky hladiny. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-156-x.
- [3] HARDY, J. E. et al. Flow Measurement Methods and Applications, New York : Wiley-Interscience, 1999. ISBN 0-471-24509-7.
- [4] WEBSTER, John G. The measurement, instrumentation, and sensors handbook. Boca Raton: CRC Press, 1999. ISBN 0-8493-8347-1.
- [5] JENČÍK, Josef. Technická měření. 3. přeprac. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1981, 230 s.
- [6] RIPKA, Pavel. Senzory a převodníky. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005dotisk, 136 s. ISBN 80-01-03123-3.
- [7] KADLEC, Karel. Coriolisovy průtokoměry. AUTOMA: časopis pro automatizační techniku [online]. Listopad 2010, 11, [cit. 2016-01-04] Dostupný z WWW: <http://automa.cz/res/pdf/42308.pdf>.
- [8] SCHMIDT, Holger. AUTOMA: časopis pro automatizační techniku [online]. Srpen 2010, 08, [cit. 2016-01-04] Dostupný z WWW: <http://automa.cz/res/pdf/41768.pdf>.
- [9] KINOVIČ, Filip, KÁŇA, Rostislav, KADLEC, Karel, Tepelné hmotnostní průtokoměry. AUTOMA: časopis pro automatizační techniku [online]. Listopad 2003, 12, [cit. 2016-01-04] Dostupný z WWW: <http://automa.cz/tepelne-hmotnostni-prutokomery-a-regulatory-29006.html>.
- [10] KADLEC, Karel. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 1). AUTOMA: časopis pro automatizační techniku [online]. Říjen 2006, 10, [cit. 2016-01-04]. Dostupný z WWW: <http://automa.cz/download/au100605.pdf>.
- [11] KADLEC, Karel. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 2). AUTOMA: časopis pro automatizační techniku [online]. Listopad 2006, 10, [cit. 2016-01-04]. Dostupný z WWW: <http://automa.cz/download/au110624.pdf>.
- [12] KADLEC, Karel. Vírové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití. AUTOMA: časopis pro automatizační techniku [online]. Říjen 2016, 10, [cit. 2016-01-04]. Dostupný z WWW: <http://automa.cz/res/pdf/53030.pdf>.
- [13] *FELIX printers* [online]. Dostupný z WWW: <http://www.felixprinters.com/>.
- [14] *easycnc* [online]. Dostupný z WWW: <https://www.easycnc.cz/>.

[15] *Farnell* [online]. Dostupný z WWW:

<http://cz.farnell.com/multicomp/mcusd14a58s9rs-30c/transceiver-58khz-14mm-metal/dp/2362684>

Seznam obrázků:

- Obr. 1: Rychlostní profil pro různé druhy proudění tekutiny [2]
Obr. 2: Oválný průtokoměr s ozubenými koly - princip a konstrukce [2]
Obr. 3: Princip Pitotovy trubice [2]
Obr. 4: Tvorba vírů za obtékaným tělesem [1]
Obr. 5: Nejpoužívanější škrtící orgány. Statický tlak před zúžením p_1 a v místě zúžení p_2 [10]
Obr. 6: Klasická Venturiho trubice [2]
Obr. 7: Impulzní průtokoměr [2]
Obr. 8: Zapojení ultrazvukových měničů průtokoměru do zpětné vazby [2]
Obr. 9: 3D tiskárna FELIX Pro 1 [13]
Obr. 10: Předloha průtokoměru pro 3D tisk
Obr. 11: Transceiver – vysílací/přijímací zařízení
Obr. 12: Osciloskop
Obr. 13: Osciloskop s generátorem
Obr. 14: Laboratorní zdroj
Obr. 15: Kompletní měřicí sestava
Obr. 16: Zkušební měření se vzduchem
Obr. 17: Výsledek měření bez zesilovače
Obr. 18: Zesilovač přední / zadní strana
Obr. 19: Schéma zesilovače
Obr. 20: Výstupní hodnoty po použití zesilovače

PŘÍLOHY:

CD s obrazovou dokumentací